

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬 (<i>Corbicula fluminea</i>) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价

周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思

(江苏大学环境与安全工程学院, 镇江 212013)

摘要:为揭示镇江老城区古运河沉积物中氮及有机质的垂向分布特征及污染状况,分别采集古运河老城区上游电力路桥(D)和下游南水桥(B)两个沉积物柱状样,分析其总氮(TN)、有机氮(Org-N)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)及有机质(O.M)含量、C/N比的垂向分布特征,并通过富集系数及污染物的综合评价,揭示古运河沉积物中污染物的演化规律和污染状况.结果表明:①D点TN、Org-N、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 以及O.M的平均值分别为 $366.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $348.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $89.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $13.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 0.43% ,B点则分别为 $940.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $893.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $169.48\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $15.19\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 0.76% ,以上指标均表现为 $D < B$,表明南水桥沉积物氮、有机质污染较电力路桥严重;②C/N比结果表明D和B两点沉积物有机质以内源为主,且主要来源于浮游动物与浮游植物;③D和B两点沉积物污染富集系数无显著差异($P > 0.05$),表明以上两个采样点沉积物对营养元素的富集过程相似;④D和B两点沉积物TN与O.M均无显著性相关,判断以上两点沉积物TN可能主要来自于外源污染;⑤有机指数评价结果显示,D和B两点有机污染呈现出清洁状态,有机氮则在较清洁、尚清洁范围.

关键词:沉积物;氮;有机质;古运河;评价

中图分类号:X522 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2014)06-2148-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.06.015

Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town

ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, WEI An-ping, ZHOU Guang-shun, XIAO Si-si

(School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to reveal vertical distribution characteristics of nitrogen and organic matter in the ancient canal sediments of Zhenjiang old town, the columnar sediment samples in Dianli road bridge (D) and Nanshui bridge (B) were collected, contents of total nitrogen (TN), organic nitrogen (Org-N), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) and organic matter (O.M) were determined, and C/N, nutrient concentration coefficient and the correlation of nitrogen, O.M and environmental factors had been analyzed, and organic nitrogen and organic index had also been evaluated. The results showed that ①The average contents of TN, Org-N, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and O.M were $366.33\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $348.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $89.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $13.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0.43% , respectively, in Dianli road bridge (D). And the average contents of TN, Org-N, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and O.M were $940.23\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $893.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $169.48\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $15.19\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0.76% , respectively, in Nanshui bridge (B). The ranked order of average N and O.M was $D < B$, which indicated that nitrogen and organic matter pollution in Nanshui bridge (B) was more serious than that in Dianli road bridge (D). ②The results of C/N indicated that the O.M source of sediment was zooplankton and phytoplankton in ancient canal. ③There was no significant difference ($P > 0.05$) of nutrient concentration coefficient between D and B sampling points, which indicated that the concentration process of nitrogen and organic matter was similar in D and B sampling points. ④TN and O.M were not significantly correlated, which indicated that TN might come from exogenous pollution. ⑤The organic index evaluation results showed that ancient canal sediments of Zhenjiang old town were in a cleaning situation, and organic nitrogen still belonged to fairly cleaning and slight cleaning categories.

Key words: sediments; nitrogen; organic matter; ancient canal; evaluation

河道污染问题在我国许多城市相当普遍,黑臭的河水不仅使城市风光黯然,而且直接威胁到城市居民的身心健康,制约城市的可持续发展.沉积物一方面作为“汇”收集来自上覆水体中沉降、颗粒物运输等多种途径带来的污染物^[1],另一方面,在特定的环境条件下,沉积物作为“源”可将污染物再次释放到上覆水体中^[2],从而引起水体二次污染.可以说,河道污染除受外界污染物输入影响外,往往与

沉积物自身污染程度亦有密切的联系,因此对河道沉积物污染背景资料的调查,将对河道污染治理具有重要意义.

收稿日期:2013-09-03;修订日期:2014-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51109097);中国博士后科学基金项目(2012T50464);江苏省基础 Research 计划(自然科学基金)项目(BK2011520);江苏省高等学校大学生实践创新训练计划项目(2012JSSPTIP1264)

作者简介:周晓红(1981~),女,博士,副教授,主要研究方向为水环境修复与生态工程,E-mail: xzhzhou0214@163.com

近年来,包括环太湖流域^[3,4]、洪泽湖^[5]、洱海^[6]在内的多条入湖河流及部分入海河口地区^[7]沉积物污染物时空分布、转运、入湖、出湖污染物通量等已有大量成果发表,且现有研究重点已逐渐由沉积物磷元素转到沉积物氮的累积、迁移、转换、再释放^[8~13]以及有机质^[9,14]等方面。前期研究表明,沉积物氮包含有机态氮(Org-N)和无机态氮,主要以有机态氮的形式存在,约占总氮含量的70%~90%,无机态氮则包括可交换态氮、固定态铵等形态^[15]。可交换态氮是水-沉积物界面氮迁移释放最主要最活跃的氮形态,是参与氮素生物地球化学循环的重要组分^[16],包括 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 NO_2^--N ,但由于 NO_2^--N 是硝化反硝化反应的中间产物,性能较不稳定,其在沉积物中的含量较低,往往可忽略不计^[4,15]。因此,TN、Org-N、 NH_4^+-N 以及 NO_3^--N 往往成为表征沉积物氮素含量的关键指标^[3,4]。

沉积物营养元素的累积是水体污染历史的真实记录^[17,18],通过污染物的垂向分布特征研究,可揭示特定水域的环境演变过程及其人类活动对环境的影响^[5]。现有研究表明,不同水域沉积物的污染物垂向分布规律差异较大,如张文斌等^[5]对洪泽湖沉积物研究表明,其总氮、总磷、有机质和重金属含量从底层至表层呈上升趋势;而宋厚燃等^[19]发现,梁滩河沉积物TN最高值出现在中间层,且沉积物底层的TN浓度总体比表层低,主要原因在于河流接纳水体水质及污染历史不同所致。可见,对不同水体沉积物污染物垂向分布特征的调查与评价研究,将为污染水体的综合治理提供关键的基础数据。到目前为止,尚未查到有关于镇江市古运河沉积物在垂直方向的污染状况相关背景资料,基于此,本研究选择古运河老城区段上游及下游共两个采样点,对沉积物氮、有机质含量及其垂向分布特征进行分析,并通过有机氮以及有机指数的评价,获得古运河沉积物内源污染状态,以期为古运河综合整治提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况和采样点选择

镇江地处长江和京杭大运河“十字黄金水道”的交汇处,市内河网纵横密布。镇江古运河由长江入口平政桥至谏壁三汊河口入大运河,全长16.69 km,汇水面积80.81 km²,平均水深4~6 m,分为上、中、下三段,其中古运河上段穿过镇江市区,成为镇

江老城区最大的接纳水体(图1)。

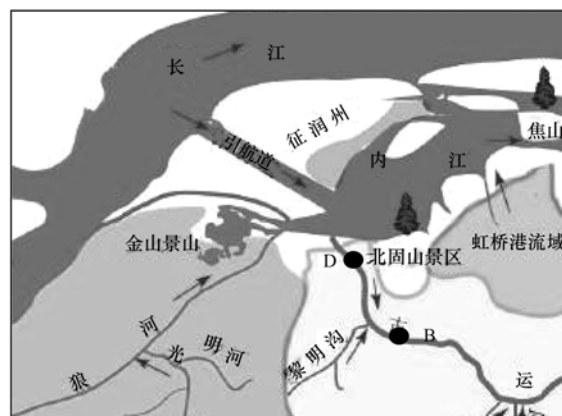


图1 镇江古运河老城区段水系和采样点位示意

Fig. 1 Watershed and sediment sampling locations in ancient canal sediments of Zhenjiang old town

研究区域为古运河上段,流经镇江市老城区,对其上段水质多年监测结果分析基础上,选择古运河上游电力路桥D(32°12'47.34"N, 119°26'26.70"E)和下游南水桥B(32°11'51.20"N, 119°27'21.71"E)作为采样点,采样区域水系和采样点位见图1所示。由于采样点位于老城区,周边主要为商业及居民住宅区,无工业企业。自20世纪90年代,镇江市进行了老城区污水截流工程,基本消除旱季污水入古运河问题,故古运河老城区段污水来源主要包括两个方面:①合流制排水管道的溢流污染,经调查,电力路桥段共有排口4~6个,电力路至南水桥段共有排口7~10个;②久晴之后暴雨初期1~2 h内管道沉积物和诸如汽车尾气、降尘等地面垃圾的地表径流污染汇入。

1.2 采样方法

采用内径10 cm沉积物柱状采泥器采集河道沉积物柱状样,D、B采样深度分别为42 cm、25 cm。采样后迅速将柱状样带回实验室低温(-20℃)垂直冷冻,弃去表层水分冰冻层后,按2.0 cm间距切割,D共获得18个土样,B共获得11个土样。每个采样点分别采集3个沉积物柱状样,计为3次重复。

1.3 样品处理与分析

切割后的沉积物样品首先采用冷冻干燥仪(LGJ-12,北京亚华顺达科技有限公司)冷冻干燥,后经玛瑙研钵研磨,过100目筛,自封袋封装后用各指标测定。

沉积物总氮采用半微量凯式法测定;硝态氮采用酚二磺酸比色法测定;铵态氮采用2 mol·L⁻¹KCl浸提-靛酚蓝比色法测定;有机质采用水合热重铬

酸钾氧化-比色法测定. 参照经验公式计算有机氮及有机碳,其中有机氮含量为 $TN \times 0.95^{[9,20]}$, 有机碳 = 有机质/1.724^[5].

2 结果与分析

2.1 古运河沉积物营养元素垂直分布特征分析

2.1.1 古运河沉积物氮素垂向分布特征

古运河沉积物氮素含量及垂直分布见图 2 所示. 从中可知,电力路桥(D)沉积物 TN 含量变化介

于 224.00 ~ 598.50 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数为 26.47%, 平均值为 366.33 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 垂直方向具有明显的波动变化, 水-土界面下约 10 cm 处沉积物 TN 含量最低, 约 18 cm 处沉积物 TN 含量最高. 南水桥(B)样点虽然沉积物淤积厚度较 D 点浅, 但沉积物 TN 含量较高, 介于 749.00 ~ 1 407.00 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数为 20.14%, 平均值为 940.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, TN 最小值及最大值分别出现在沉积物表层及底层约 24 cm 处.

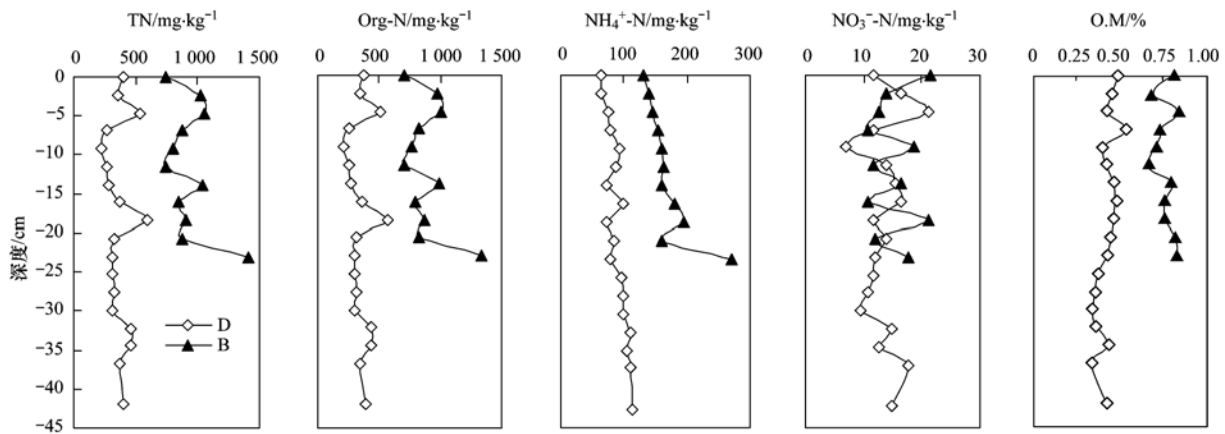


图 2 古运河沉积物营养元素垂直分布

Fig. 2 Nutrient vertical distribution in ancient canal sediments of Zhenjiang old town

D 和 B 两采样点沉积物 Org-N 垂直分布特征 TN 相似. 研究表明, 沉积物有机氮主要包括蛋白质、核酸、氨基酸和腐殖质等^[15], 除了外源有机氮输入外, 大部分来自于内源浮游植物残体碎屑、水生动物代谢产物、高等水生植物残体以及细菌体等^[21]. 由于有机氮可在微生物等作用下转化成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 等生物可利用的无机态氮形式, 并扩散进入上覆水体, 增加水体氮含量^[15], 成为水生生态系统营养盐生物地球化学循环以及生物生命过程中的重要环节^[3,22], 因此沉积物有机态氮含量在一定程度上可以反映湖泊、河口等水生生态系统的初级生产力水平^[21]. 本研究中, D 和 B 采样点 Org-N 平均值 348.02 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 893.22 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 介于 212.80 ~ 568.58 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 711.55 ~ 1 336.65 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 在适宜的条件下, 这些有机氮可能成为古运河沉积物及上覆水体中无机态氮的重要“源”之一.

古运河沉积物氨氮在垂直方向上表现为随深度的增加逐渐增加的趋势, 其中 D 样点氨氮峰值出现在最底层, 含量为 112.93 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 较表层增幅 1.73 倍, B 样点氨氮浓度则由表层的 129.73 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到底层的 271.60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 增幅 2.09 倍. 此外,

D 和 B 两样点的氨氮在总氮中所占比例分别介于 12.09% ~ 41.67% 和 13.51% ~ 21.81%, 变异系数为 27.83% 和 16.24%, 而在无机氮中所占比例分别达 78.57% ~ 93.02% 和 85.80% ~ 94.40%, 变异系数为 4.22% 和 2.73%, 表明以上两样点沉积物无机氮主要以氨氮形式存在. 对于硝态氮而言, D 和 B 样点沉积物在垂直方向上具有较大的波动, 且无明显规律, 两个样点沉积物硝态氮在总氮中所占比例为 1.95% ~ 5.57% 和 1.18% ~ 2.87%, 变异系数为 24.45% 和 33.97%, 在无机氮中所占比例为 7.5% ~ 27.27% 和 5.93% ~ 16.55%, 变异系数为 32.12% 和 33.22%, 可见古运河 D 和 B 样点沉积物 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量在总氮中的比例较低.

古运河两采样点沉积物中高氨氮、低硝态氮的无机氮分布特征与该河流水质理化因子、污染水平以及氮的硝化-反硝化过程密切相关. 本研究中, 尽管 D 和 B 两个采样点水体表层 DO 含量均较高(平均值为 7.94 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 7.27 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 但由于该河流平均水深约 4 ~ 6 m, 加之沉积物所含大量有机质的耗氧, 导致沉积物-水界面处于缺氧状态, 而沉积物-水界面 O_2 的匮乏一方面限制硝化细菌的生长, 导致硝化反应减弱, 使得 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 不易转化为

NO_3^- -N; 另一方面加速反硝化反应, 上覆水向沉积物扩散来的 NO_3^- -N 参与反硝化, 使得沉积物中 NO_3^- -N 含量明显低于 NH_4^+ -N^[3, 23]; 此外, 沉积物还原性环境 (D 和 B 沉积物 pH 平均值为 7.76 和 8.51), 使得硝化作用产生的 NO_2^- -N 以及 NO_3^- -N 将因缺氧状态及其电子供体的充足而促使高价态的 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 向低价态的 NH_4^+ -N 转化^[24], 以上 3 个方面的原因共同导致古运河沉积物丰富的无机态氮的存在。而两样点的氨氮峰值均出现在沉积物的最下层, 主要原因在于相对于上层, 沉积物下层缺氧程度更高, 促使高价态 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 向低价态 NH_4^+ -N 的转化, 同时下层沉积物由于受到较小的水动力扰动, 更加有利于 NH_4^+ -N 在沉积层中保存^[25], 由此导致底层沉积物含有较高的 NH_4^+ -N。

对 D 和 B 两个采样点沉积物氮含量的横向比较可知, 沉积物 TN、Org-N、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 平均浓度均表现为 D < B, 表明南水桥采样点沉积物中含有较高水平的氮素。以上结果与古运河历史时期污染物的排放状况较为吻合, 镇江市古运河由长江入口平政桥至谏壁三岔河口入大运河, 由于电力路桥处于古运河镇江老城区段的上游方向, 靠近长江入河口, 来水受长江水体影响较大, 加之周围基本无工业企业, 使得该区域水质较好, 而南水桥处于古运河镇江老城区段的下游方向, 历史时期自中山桥、虎踞桥、南侧从中山桥黎明河出口段均无截流管网, 日排入污水 3 000 m^3 左右, 加之南水桥下游方向河床抬高, 断面狭窄, 正常水位时最窄处仅 2 m 多宽, 形成污水倒流, 加剧了南水桥段污染, 使得南水桥河段污染较电力路河段有所加剧。但该河段自 20 世纪 90 年代至今先后进行了一系列的整治措施后, 外源污染有所下降, 由此导致南水桥沉积物表层污染物浓度显著低于底层。

2.1.2 古运河沉积物有机质垂向分布特征

沉积物有机质主要指沉积物中的腐殖质以及其它有机化合物, 其在湖泊物质循环过程中扮演着重要角色^[26], 是反映沉积物有机污染程度的重要标志^[9, 27, 28]。如孟凡德等^[29]对长江中下游湖泊沉积物研究结果表明, 有机质含量越高, 湖泊污染程度越严重。古运河 D 和 B 采样点沉积物 O.M 值如图 2 所示, 从中可知, D 样点 O.M 值在垂直方向波动变化, 其中, 8 cm 处出现峰值, 最后逐渐下降, O.M 值介于 0.34% ~ 0.54%, 变异系数 12.76%, 平均值为 0.43%; B 样点 O.M 值在垂直方向上波动较为剧烈, 且无明显规律, O.M 值介于 0.66% ~ 0.84%, 变

异系数 7.84%, 平均值为 0.76%。

通过有机质与有机碳之间的经验公式^[5], 换算得到沉积物有机碳的垂直分布特征, 同时对 C/N 比进行计算, 结果表明, D 和 B 两采样点 C/N 比在垂向上波动变化, 平均值分别为 7.18 和 4.84, 介于 4.50 ~ 11.73 和 3.40 ~ 6.30, 变异系数为 28.87% 和 15.98%。沉积物 C/N 比可反映有机质来源^[30], 原因在于水生态系统生物种类的差异, 其中藻类富含蛋白质而缺乏纤维素, 而维管类高等植物体内纤维素含量高, 蛋白质含量较低^[21], 由此导致沉积物 C/N 比的显著差异, 研究表明高等水生植物和浮游动植物等的 C/N 比分别介于 14 ~ 23、2.8 ~ 3.4、6 ~ 13、5 ~ 14^[5, 31]。此外, 由于蛋白质是生物体中最重要的含氮成分, 不同类型有机质所含蛋白质不同^[32], 因此, 利用 C/N 比可区分不同类型的有机质, 并依此判断有机质的来源。如 Prahl 等^[33]认为湖泊沉积物的 C/N 比大于 12 时代表陆源有机质, 小于 8 则代表湖泊自身有机质。而也有学者认为当 C/N > 10 时, 沉积物有机质以外源为主, C/N < 10 时, 则以内源有机质为主, 而 C/N ≈ 10 时, 表明外源与内源有机质基本达到平衡状态^[20, 34 ~ 37]。根据以上判断标准可知, 古运河两个采样点沉积物有机质平均值均小于 8, 表明其以内源贡献为主, 且主要来源于浮游动物与浮游植物, 这一结果与古运河现状较为吻合, 目前, 水生高等植物仅在河岸局部地区有少量分布, 而本研究中两个采样点均处于河流断面中心位置, 水深约 4.0 ~ 6.0 m, 采样点处未发现水生高等植物的生长。

2.2 古运河沉积物营养盐的富集系数

沉积物营养元素的垂向分布是水体污染历史的记录, 而富集系数可反映沉积物不同深度处营养盐的汇入情况。目前对沉积物污染物富集系数的研究大部分集中在沉积物重金属方面^[20, 29]。污染物的富集系数通常以沉积物某一深度处污染物含量与背景值的比值加以计算, 背景值往往选择当地土壤背景值^[20], 这种方法通过对污染物进行无量纲化处理, 可有效避免污染物浓度数量级之间的差异, 以便进行不同区域间的横向对比。此外, 也有人采用不同的方法计算营养盐的富集系数, 如王朝晖等^[7]的计算方法为: 微表层营养盐浓度与次表层营养盐浓度的比值, 微表层富集概率为富集系数大于 1.0 的样品数占总样品的百分率, 结果表明, 大亚湾海域微表层对大部分营养盐具有一定的富集作用, TP 富集强度较强, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 DIN 的富集作

用稍弱;而赵海超等^[6]则通过模型拟合来表达沉积物对各形态氮的富集特征。

由于古运河沉积物缺乏背景资料的累积,目前尚未查到相关沉积物的背景值资料,无法通过背景值法获得沉积物营养元素的富集系数;此外,参照赵海超等^[6]的方法,对古运河两个采样点沉积物采样深度(x)与污染物质量分数(y)之间进行指数增长模型拟合,根据模型 R^2 判断,两采样点沉积物的 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、Org-N、O. M 等污染物质量分数随着沉积物深度变化均不符合指数

增长模型,通过该模型无法表征采样点沉积物的富集状况.因此,本研究借鉴王朝晖等^[7]的方法获得沉积物不同深度处营养盐的富集系数.具体计算方法为:沉积物营养盐浓度同与之相邻的下层营养盐浓度的比值,底层沉积物不进行富集系数的计算,若比值大于 1.0,表示营养盐在该层富集,而富集概率则为富集系数大于 1.0 的样品数占总样品的百分率.通过以上计算方法,对 D 和 B 两样点营养盐富集情况进行计算及统计,结果如图 3 所示。

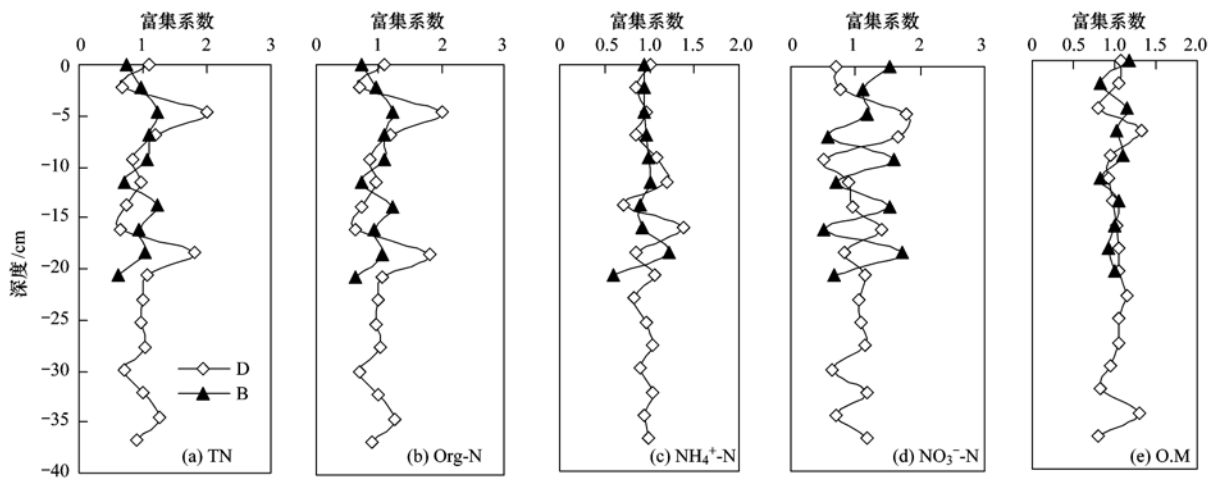


图 3 古运河沉积物营养元素富集系数的垂向变化

Fig. 3 Vertical distribution of nutrient concentration coefficient in ancient canal sediments of Zhenjiang old town

由图 3 可知,古运河沉积物中不同营养元素在垂直方向上的富集特征略有差异,TN、Org-N、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的富集系数随沉积物深度的增加波动较大,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以及 O. M 的变幅则较小,尤其是 O. M, D 和 B 两样点的平均值为 1.02 和 1.01,变异系数分别为 14.52% 和 12.08%,介于 0.79 ~ 1.33 和 0.82 ~ 1.18 之间.两采样点横向对比可知,TN、Org-N、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以及 O. M 的富集系数平均值均表现为 D > B,方差分析结果表明,D 和 B 采样点沉积物污染富集系数无显著差异($P > 0.05$),表明以上两个采样点沉积物对营养元素的富集过程较为相似.从富集概率来看,D 和 B 两样点 TN、Org-N 以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均小于或等于 50%,而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 以及 O. M 均大于 50%。

2.3 古运河沉积物营养盐与沉积物理化因子的相关性分析

营养元素在生物体内存在一定的比例,当这些生物死亡残体再次释放到沉积物后,亦存在一定的相互作用,由此决定了沉积物中营养元素之间往往

具有一定的相关性^[20,38].本研究通过 Pearson 系数对古运河沉积物营养盐及其与沉积物理化指标相关性进行分析,结果见表 1 和表 2.由表 1 可知,D 采样点沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 O. M、Eh、有机碳之间均显著相关,O. M 与 Eh 显著相关,有机碳与 Eh 显著相关,其余营养元素之间的相关关系均未达到显著水平. B 采样点沉积物中 TN 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,Org-N 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 Eh 间显著相关,其余各指标间均无显著的相关关系.两个采样点沉积物的 TN 与 O. M 均无显著性相关,表明 D 和 B 两点沉积物 TN 并不是主要来源于有机质,由此判断,以上两点 TN 不是通过生物沉积,可能主要来自于外源污染。

2.4 古运河沉积物营养盐污染状况的评价

采用较为常用的有机指数和有机氮方法^[9,20,28]对古运河沉积物营养盐污染状况进行评价.其中,有机指数通常被用作沉积物环境状况的评价指标,有机指数 = 有机碳(%) × 有机氮(%);有机氮也是衡量湖泊表层沉积物是否遭受氮污染的重要指标,有机氮 = $\text{TN} \times 0.95$ ^[9,20].评价标准如表 3 所示。

表 1 电力路样点沉积物营养盐与沉积物理化因子间的相关性系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficient of nutrients and physicochemical factors in Dianli road sediments								
	TN	Org-N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	O. M	pH	Eh	有机碳
TN	1. 000							
Org-N	1. 000	1. 000						
NH ₄ ⁺ -N	-0. 010	-0. 010	1. 000					
NO ₃ ⁻ -N	0. 414	0. 414	-0. 023	1. 000				
O. M	0. 039	0. 039	-0. 653 **	0. 084	1. 000			
pH	-0. 046	-0. 046	-0. 081	-0. 118	0. 310	1. 000		
Eh	-0. 166	-0. 166	-0. 701 **	-0. 081	0. 574 *	0. 557 *	1. 000	
有机碳	0. 039	0. 039	-0. 653 **	0. 084	1. 000	0. 310	0. 574 *	1. 000

1) * 为在 $P < 0.05$ 水平上相关性显著, ** 为在 $P < 0.01$ 水平上相关性显著

表 2 南水桥样点沉积物营养盐与沉积物理化因子间的相关性系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient of nutrients and physicochemical factors in Nanshui bridge sediments								
	TN	Org-N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	O. M	pH	Eh	有机碳
TN	1. 000							
Org-N	1. 000	1. 000						
NH ₄ ⁺ -N	0. 702 *	0. 702 *	1. 000					
NO ₃ ⁻ -N	0. 084	0. 084	0. 178	1. 000				
O. M	0. 439	0. 439	0. 234	0. 235	1. 000			
pH	0. 418	0. 418	0. 438	-0. 503	0. 024	1. 000		
Eh	-0. 395	-0. 395	-0. 665 *	-0. 335	-0. 442	0. 061	1. 000	
有机碳	0. 439	0. 439	0. 234	0. 235	1. 000	0. 024	-0. 442	1. 000

1) * 为在 $P < 0.05$ 水平上相关性显著, ** 为在 $P < 0.01$ 水平上相关性显著

表 3 沉积物有机氮及有机指数评价标准^[9,20,28]

Table 3 Evaluation standards of organic nitrogen and organic index in sediments				
等级	I	II	III	IV
有机指数	<0. 05 清洁	≥0. 05 ~ <0. 20 较清洁	≥0. 20 ~ <0. 50 尚清洁	≥0. 50 有机污染
有机氮/%	<0. 033 清洁	≥0. 033 ~ <0. 066 较清洁	≥0. 066 ~ <0. 133 尚清洁	≥0. 1333 有机氮污染

根据表 3 对古运河沉积物有机指数及有机氮进行计算分析,结果见图 4 所示. 从中可知,D 和 B 两采样点有机指数分别介于 0. 005 ~ 0. 02 和 0. 03 ~ 0. 06 之间,变异系数分别为 30. 41% 和 25. 14%,平均值分别超过“污染/IV”等级的 1. 72% 和 7. 97%,有机指数最高值则分别超过“污染/IV”等级的 3. 06% 和 12. 78%,表明古运河沉积物有机物指数为清洁状态. 对于有机氮而言,D 和 B 两采样点有机氮分别介于 0. 021% ~ 0. 057% 和 0. 071% ~ 0. 134% 之间,变异系数分别为 26. 48% 和 20. 14%,分别处于较清洁、尚清洁范围. D 和 B 两点横向对比可知,有机氮及有机指数均表现为 $D < B$,表明 D 采样点的污染程度明显轻于 B 点,表明南水桥沉积物污染比电力路桥严重.

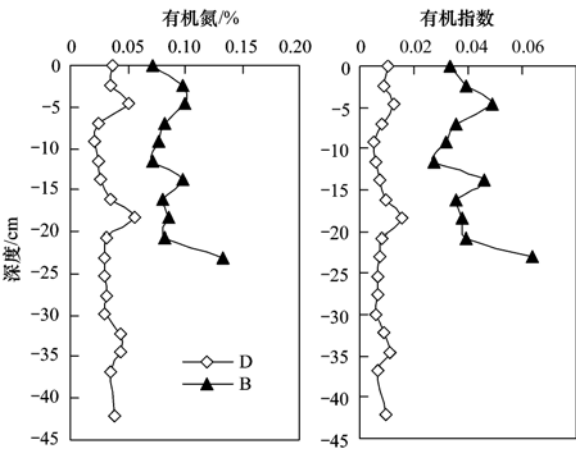


图 4 古运河沉积物有机氮及有机指数的垂向变化
Fig. 4 Vertical distribution of organic nitrogen and organic index in ancient canal sediments of Zhenjiang old town

3 结论

(1)古运河沉积物氮素及有机质在垂直方向具有不同的波动变化规律,沉积物 TN、Org-N、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 以及 O. M 质量分数均表现为 D < B,表明南水桥沉积物氮、有机质污染较为严重. C/N比结果表明 D 和 B 两点沉积物有机质以内源为主,且主要来源于浮游动物与浮游植物.

(2)沉积物 TN、Org-N、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以及 O. M 富集系数均表现为 D > B,但两样点间无显著差异($P > 0.05$),表明两采样点沉积物氮、有机质的富集过程较为相似.

(3)古运河沉积物营养盐与沉积物理化指标相关性分析结果表明,D 和 B 两点沉积物 TN 与 O. M 无显著性相关,表明 TN 并不是主要来源于有机质及生物沉积,可能来自于外源污染输入.

(4)沉积物有机指数评价结果表明,D 和 B 有机指数平均值分别超过“污染/IV”等级的 1.72% 和 7.97%,有机指数最高值则分别超过“污染/IV”等级的 3.06% 和 12.78%,表明古运河沉积物有机指数为清洁状态. 而有机氮评价结果表明,D 和 B 两采样点分别处于较清洁、尚清洁范围. 从有机氮及有机指数亦可判断出,南水桥采样点(B)的污染程度明显重于电力路桥(D)点.

(5)通过两个样点沉积物氮、有机质的垂直分布及评价结果的分析,镇江市古运河老城区段沉积物有机质处于清洁状态,有机氮则处于较清洁、尚清洁范围. 镇江市古运河应进一步加强水环境的保护,严格控制合流制排水过程的溢流污染及地表径流污染带来的污染负荷. 此外,可结合航道淤泥清淤、航道治理等,逐步减少沉积物的内源污染释放.

参考文献:

- [1] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京:中国环境科学出版社,1990.
- [2] Gross A, Boyd C E, Wood C W. Nitrogen transformations and balance in channel catfish ponds [J]. *Aquacultural Engineering*, 2000, **24**(1): 1-14.
- [3] 卢少勇,远野,金相灿,等. 7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1497-1504.
- [4] 许梦爽,卢少勇,黄国忠,等. 28 条环太湖河流沉积物氮的分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(7): 1381-1386.
- [5] 张文斌,余辉. 洪泽湖沉积物中营养盐和重金属的垂向分布特征研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 399-406.
- [6] 赵海超,王圣瑞,焦立新,等. 洱海沉积物中不同形态氮的时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(3): 235-242.
- [7] 王朝晖,杨宇峰,宋淑华,等. 大亚湾海域营养盐的季节变化及微表层对营养盐的富集作用[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(2): 307-315.
- [8] Poulenard J, Dorioz J M, Elsass F. Analytical electron-microscopy fractionation of fine and colloidal particulate-phosphorus in riverbed and suspended sediments [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2008, **14**(3): 193-210.
- [9] 卢少勇,许梦爽,金相灿,等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 393-398.
- [10] Xia X H, Liu T, Yang Z F, *et al.* Dissolved organic nitrogen transformation in river water: Effects of suspended sediment and organic nitrogen concentration [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **484**: 96-104.
- [11] Palma P, Ledo L, Soares S, *et al.* Spatial and temporal variability of the water and sediments quality in the Alqueva reservoir (Guadiana Basin; southern Portugal) [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 780-790.
- [12] Ding X J, Jiang C L. Pollution characteristics of nutrients in sediment at Changtan reservoir [J]. *Procedia Engineering*, 2012, **28**: 178-181.
- [13] Li Z Y, Jia G D. Separation of total nitrogen from sediments into organic and inorganic forms for isotopic analysis [J]. *Organic Geochemistry*, 2011, **42**(3): 296-299.
- [14] 张远,张彦,于涛. 太湖典型湖区沉积物外源有机质贡献率研究[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(3): 251-258.
- [15] 李辉,潘学军,史丽琼,等. 湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 281-291.
- [16] 王圣瑞,焦立新,金相灿,等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态氮的赋存特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 37-43.
- [17] von Gunten H R, Sturm M, Moser R N. 200-year record of metals in lake sediments and natural background concentrations [J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, **31**(8): 2193-2197.
- [18] 吴艳宏,王苏民. 龙感湖沉积物中人类活动导致的营养盐累积通量估算[J]. *第四纪研究*, 2006, **26**(5): 843-848.
- [19] 宋厚燃,马利民,闵真真. 梁滩河沉积物中氮磷垂直分布研究[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(6): 42-50.
- [20] 王天阳,王国祥. 昆承湖沉积物中重金属及营养元素的污染特征[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(1): 51-58.
- [21] 于宇,宋金明,李学刚,等. 沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义[J]. *生态学报*, 2012, **32**(5): 1623-1632.
- [22] 吴丰昌,金相灿,张润宇,等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(1): 1-7.
- [23] 范成新,杨龙元,张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. *湖泊科学*, 2000, **12**(4): 359-366.
- [24] 陈国元,李建秋,李清曼,等. 武汉月湖沉积物不同形态氮含量与转换途径的垂直变化[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(4): 463-469.
- [25] 罗玉兰,徐颖,曹忠. 秦淮河底泥及间隙水氮磷垂直分布及

- 相关性分析[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1245-1249.
- [26] 王圣瑞, 赵海超, 王娟, 等. 有机质对湖泊沉积物不同形态氮释放动力学影响研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 332-340.
- [27] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 961-968.
- [28] 王永华, 刘振宇, 刘伟, 等. 巢湖合肥区底泥污染物分布评价与相关特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, **39**(4): 501-506.
- [29] 孟凡德, 姜霞, 金相灿. 长江中下游湖泊沉积物理化性质研究[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(S1): 24-29.
- [30] 甘树, 卢少勇, 秦普丰, 等. 太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3064-3070.
- [31] 蔡金榜, 李文奇, 刘娜, 等. 洋河水库底泥污染特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(3): 886-893.
- [32] 葛晨东, 王颖, Pedersen T F, 等. 海南岛万泉河口沉积物有机碳、氮同位素的特征及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2007, **27**(5): 845-850.
- [33] Prah F G, Bennett J T, Carpenter R. The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, **44**(12): 1967-1976.
- [34] 刘恩峰, 沈吉, 朱育新, 等. 太湖沉积物重金属及营养盐污染研究[J]. 沉积学报, 2004, **22**(3): 507-512.
- [35] 张雷, 郑丙辉, 田自强, 等. 西太湖典型河口区湖滨带表层沉积物营养评价[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(5): 4-9.
- [36] Krishnamurthy R V, Bhattacharya S K, Kusumgar S. Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and C/N ratios of Karewa Lake sediments, India [J]. *Nature*, 1986, **323**(6084): 150-152.
- [37] 王苏民, 冯敏. 内蒙古岱海湖泊环境变化与东南季风强弱的关系[J]. 中国科学 B 辑, 1991, (7): 759-768.
- [38] 吕晓霞, 翟世奎, 于增慧. 长江口及邻近海域表层沉积物中营养元素的分布特征及其控制因素[J]. 海洋环境科学, 2005, **24**(3): 1-5.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行